

การเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอตที่ปนเปื้อนในดินเพาะปลูก

วิมิตา ขำอินทร์, จิรภัทร อนันต์ภักตร์ชัย และพวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล

นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000, E-mail: v.khumin@gmail.com

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000, E-mail: jirapata@nu.ac.th

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000, E-mail: puangratk@nu.ac.th

บทคัดย่อ – สารพาราควอตเป็นสารเคมีปราบศัตรูพืชที่นิยมใช้
ในภาคเหนือของประเทศไทย การใช้งานสารพาราควอตในพื้นที่
เกษตรกรรมนั้นส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนสารพาราควอตในดิน
งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปทางกายภาพและเคมีของ
สารพาราควอตที่เกิดขึ้นในดินเพาะปลูก ซึ่งประกอบไปด้วย การ
ทดลองการระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอต การย่อยสลาย
ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส
การดูดซับ และการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ใน
ดิน โดยจากการศึกษาพบว่าสารพาราควอตเป็นสารที่มีความ
เสถียรภาพสูง ไม่เกิดการระเหยกลายเป็นไอ การเกิดปฏิกิริยา
ไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาโฟโตไลซิสน้อย โดยมีร้อยละการ
เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำเป็น 4.2 และ
5.61 ตามลำดับ ในส่วนการดูดซับนั้นสารพาราควอตเป็นสารที่
สามารถดูดซับในดินสูงพบว่า กระบวนการดูดซับของพาราควอต
ในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายมีการดูดซับอย่างรวดเร็วเข้าสู่
การดูดซับภายในเวลา 8 ถึง 10 นาที โดยรูปแบบการดูดซับของ
สารพาราควอตในดินเหนียวสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของ
แลงเมียร์ ซึ่งมีค่าคงที่ของแลงเมียร์เท่ากับ 0.1176 ลิตรต่อ
มิลลิกรัม และค่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 1,250
มิลลิกรัมต่อกรัม รูปแบบการดูดซับของสารพาราควอตในดิน-
ร่วนปนทรายสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดย
มีค่าคงที่ของแลงเมียร์เท่ากับ 0.0464 ลิตรต่อมิลลิกรัม และค่า
ความสามารถสูงสุดของการดูดซับเท่ากับ 909.091 มิลลิกรัมต่อ
กรัม โดยดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับสารพาราควอต
ได้ดีและเข้าสู่สมดุลการดูดซับในเวลาอันสั้นกว่าดินร่วนปนทราย

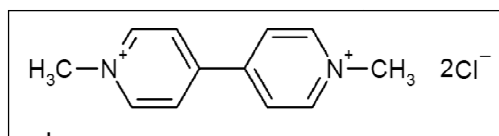
นอกจากนี้สารพาราควอตนั้นสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ใน
ดินได้อย่างรวดเร็วภายใน 60 นาที

Abstract - Paraquat is one of widely used herbicide in
Northern Thailand. Application of paraquat in agricultural
area causes the soil contamination in many areas. This work
investigated fate of paraquat in contaminated soil included
evaporation, hydrolysis, photolysis, adsorption and
biodegradation of paraquat using batch experiment. This
study showed that less amount of paraquat was removed by
volatilization, hydrolysis and photolysis process. The removal
percentages of paraquat from hydrolysis and photolysis are
4.2 and 5.61, consecutively. Paraquat was highly adsorbed in
soil through adsorption and partitioning process. It was
found that adsorption of paraquat in clay and sandy clay
exhibited an immediate rapid sorption and the adsorption
process reached equilibrium within 8 to 10 minute.
Adsorption isotherm of paraquat of clay followed Langmuir
equation with K_1 as of 0.1176 L/mg and the highest
adsorption capacity are 1250 mg/g. Adsorption isotherm of
sandy clay also followed Langmuir equation with K_1 as of
0.0464 L/mg and the highest adsorption capacity are 909.091
mg/g. Clay can absorb parquat much better than sandy clay
and can reach adsorption equilibrium faster sandy clay.
Moreover, paraquat can be degraded by soil microorganism
within 60 min.

Keywords – Paraquat, Agricultural Soil, Adsorption, Biodegradation

1. บทนำ

การตกค้างของสารเคมีจากสารกำจัดวัชพืชในดินเป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากการใช้สารกำจัดวัชพืชกันอย่างแพร่หลายในพื้นที่เกษตรกรรม โดยสารพาราควอต (paraquat) หรือกรัมม็อกโซน (gramoxone) เป็นสารเคมีกำจัดวัชพืชชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มแบบไม่เลือกทำลาย (non-selective herbicide) ซึ่งสามารถทำลายพืชทุกชนิดที่สัมผัสและยังทำลายเชื้อหุ้มเซลล์ (contacts-membrane disrupters) ใช้ในการควบคุมวัชพืชทั้งใบกว้างใบแคบมากกว่า 50 ชนิด นอกจากนี้ถูกใช้ในพื้นที่เพาะปลูก อาทิเช่น ไร่ข้าวโพด แปลงผัก และใช้ฉีดพ่นก่อนเก็บเกี่ยวเพื่อทำลายใบพืชช่วยให้การเก็บเกี่ยวง่ายขึ้น เช่น ฟ้าย อ้อย ทานตะวัน เป็นต้น [1] มีสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารพาราควอตแสดงดังภาพ 1



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพาราควอต

การใช้สารพาราควอตในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการตกค้างของสารพาราควอตสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการตกค้างในดิน เนื่องจากสารพาราควอตเป็นสารที่สามารถดูดซับในดินได้ดี โดยมีค่า SORPTION COEFFICIENT (K_p) สูง (317.73 มิลลิกรัมต่อกรัม) และพบว่ามีค่าครึ่งชีวิตของสารพาราควอตในดิน อยู่ในช่วง 16 เดือน (ในห้องปฏิบัติการ) ถึง 13 ปี (ในธรรมชาติ) [2] สารพาราควอตจึงสามารถตกค้างได้นานในดิน นอกจากการตกค้างในดินแล้วยังสามารถชะล้างไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำใต้ดิน และตกค้างอยู่ในสิ่งมีชีวิต รวมถึงมีความเป็นพิษต่ออวัยวะในร่างกายมนุษย์ ได้แก่ ปอด หัวใจ ตับ ไต ดวงตา ผิวหนัง ต่อมนมวกไต และระบบการย่อยอาหาร [3, 4]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอตในดินพื้นที่เกษตรกรรมจังหวัดน่าน ซึ่งเป็นจังหวัดที่พื้นที่ส่วนใหญ่ใช้ในการทำเกษตรกรรม อาทิ ไร่

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และสวนยางพารา และมีการใช้สารกำจัดวัชพืชในปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการฉีดพ่นสารพาราควอตและจากลักษณะการเพาะปลูกของเกษตรกรจังหวัดน่านซึ่งเป็นข้อมูลจากสำนักงานเกษตรจังหวัดน่าน พบว่าจะมีรอบการปลูกอยู่ที่ 3-4 รอบต่อปี ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ และปริมาณน้ำที่มีในช่วงฤดูกาลนั้น รวมไปถึงความถี่ในการใช้สารกำจัดศัตรูพืช จึงส่งผลให้เกิดการตกค้างของสารพาราควอต

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของสารพาราควอตที่เกิดขึ้นในดินเกษตรกรรม ซึ่งจะทำให้สารพาราควอตเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยผลวิจัยที่ได้สามารถนำไปใช้ในการเฝ้าระวังและป้องกันการปนเปื้อนของสารพาราควอตในสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษการเปลี่ยนแปลงรูปทางกายภาพและเคมีของสารพาราควอตที่เกิดขึ้นในดินเพาะปลูกนี้เริ่มต้นจากการเลือกชุดดินที่นำมาศึกษา โดยการสำรวจพื้นที่การปนเปื้อนสารพาราควอตในพื้นที่เกษตรกรรม และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย

2.1 การหาลักษณะคุณสมบัติดิน ได้แก่ ประเภทของดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน (soil pH) อินทรีย์วัตถุของดิน (organic matter) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน โดยประยุกต์จากวิธีการทดลองจากคู่มือปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมีกรมพัฒนาที่ดิน [5]

2.2 การทดลองการระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอต (evaporation experiment) ทำการทดลองหาค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่สามารถระเหยสู่อากาศที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร [6] โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างอยู่ในน้ำ

2.3 การทดลองการย่อยสลายสารพาราควอต ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis experiment) ทำการทดลองหาอัตราการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25

องศาเซลเซียส และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4 การทดลองการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis experiment) ทำการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5 การทดลองการดูดซับของสารพาราควอตในดินในรูปกะ (batch experiment) โดยเป็นการหาไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองลักษณะ ได้แก่ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ และไอโซเทอมของฟรุนดลิช โดยเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 200, 400, 600, 800, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ [7]

2.6 การทดลองย่อยสลายสารพาราควอตด้วยอุลตราซาวด์ในดิน โดยทำการทดลองในรูปแบบกะ (batch experiment) โดยทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรในดิน และสกัดหาค่าความเข้มข้นของสารพาราควอต โดยประยุกต์จากวิธีการ ultrasonic extraction ตามวิธีขององค์กรปกป้องสิ่งแวดล้อมของอเมริกา (EPA) [6]

ซึ่งการทดลองดังกล่าวจะทำให้ทราบค่าความเข้มข้นของสารพาราควอต และลักษณะพฤติกรรมของสารพาราควอตในดินของแต่ละการทดลอง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินจากพื้นที่เกษตรกรรมจังหวัดน่าน ได้แก่ ตัวอย่างดินจากบ้านหนองรัง ตำบลท่าน้าว อำเภอเมือง อำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน และบ้านท่าน้าว ตำบลท่าน้าว อำเภอเมือง อำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน พบว่า มีลักษณะคุณสมบัติ แสดงดังตาราง 1 ดินที่บ้านหนองรังมีลักษณะเป็นดินเหนียว มีร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 5.598 และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับดินที่บ้านท่าน้าวมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย มีร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 4.958 และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าดินบ้านหนองรัง

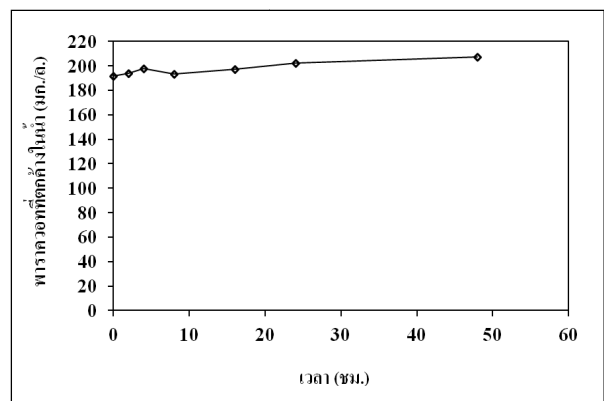
ตารางที่ 1 แสดงลักษณะคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

สถานที่เก็บ	บ้านหนองรัง	บ้านท่าน้าว
ประเภทดิน	ดินเหนียว	ดินร่วนปนทราย
ความเป็นกรด-ด่างของดิน	6.59	5.55
ร้อยละอินทรีย์วัตถุ	5.598	4.958
ค่า CEC (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	12.765	10.524

หมายเหตุ ค่า CEC คือค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

3.2 การระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอต

จากผลการทดลองลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายตัวของสารพาราควอตในดินพบว่า การระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอตที่สภาวะตัวกลางที่เป็นกลาง (พีเอชเท่ากับ 7) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากภาพ 2 สังเกตได้ว่า ที่เวลาเริ่มต้นถึงเวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างอยู่ในน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น สันนิษฐานว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการระเหยของน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารพาราควอตเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีการระเหยของสารพาราควอต และเมื่อพิจารณาจากลักษณะคุณสมบัติค่าความดันไอ และค่าคงที่ของเฮนรี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งชี้แนวโน้มการระเหยกลายเป็นไอของสารเคมี จะเห็นได้ว่า สารพาราควอตมีค่าความดันไอเท่ากับ $<1 \times 10^{-8}$ กิโลปาสกาล และมีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ 4×10^{-9} ปาสกาล-ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [8] ซึ่งมีค่าน้อย ทำให้สารพาราควอตเป็นสารที่ไม่ระเหย



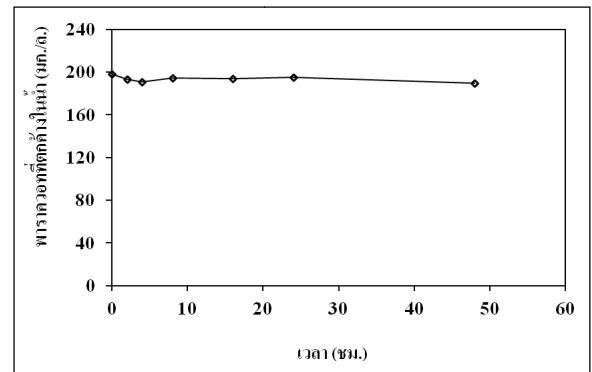
รูปที่ 2 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างในน้ำที่เวลาต่างๆ ด้วยการระเหยกลายเป็นไอ

3.3 การย่อยสลายสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

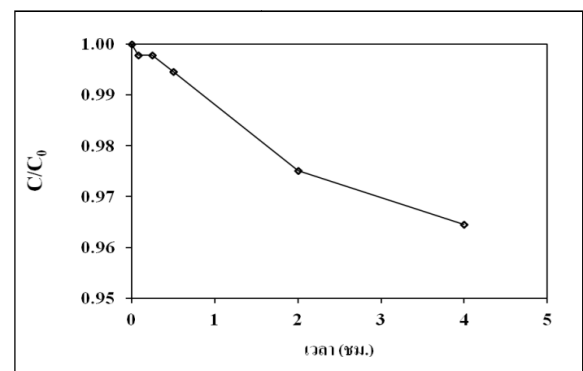
จากผลการทดลองการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพ 3 พบว่า ที่เวลา 48 ชั่วโมง ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำมีค่าลดลงในช่วง 4 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุล โดยคิดค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ลดลงเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 1.57 และเมื่อนำมาศึกษาอัตราการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใน 4 ชั่วโมงแรก พบว่าค่าอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตในช่วงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.7538 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0098 ต่อชั่วโมง ดังภาพ 4 และภาพ 5

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นพันธะใหม่ระหว่างออกซิเจนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำและคาร์บอนที่ได้จากโมเลกุลของสารเคมี ดังนั้นสันนิษฐานว่าการเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตจะเกิดขึ้นในลักษณะดังภาพ 6 โดยออกซิเจนของโมเลกุลน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของสารพาราควอต โดยใน 4 ชั่วโมงแรก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่คาร์บอนพันธะเดี่ยวของพาราควอตและหลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้าหรือไม่เกิดขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่เหลืออยู่เป็นสารประกอบไบไพริดิเลียม (bipyridinium)

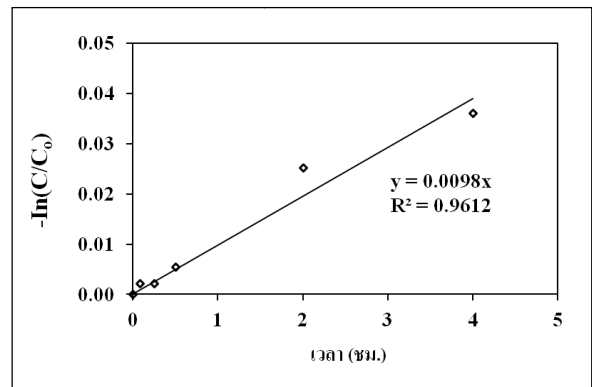
และเมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการทดลองโดยการเตรียมสารพาราควอตความเข้มข้น 91 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอช 7.59 และที่อุณหภูมิ องศาเซลเซียส 40 และ 25 เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าสารพาราควอตเป็นสารที่เสถียรภาพกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะตัวกลางที่เป็นกรด เป็นกลางและเป็นด่าง [8]



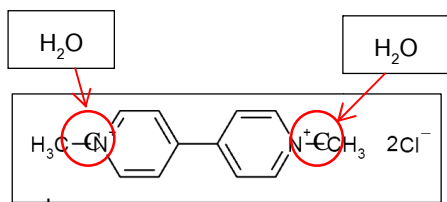
รูปที่ 3 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างในน้ำที่เวลาต่างๆ ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



รูปที่ 4 อัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตที่เวลา ชั่วโมง 4



รูปที่ 5 อัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตที่เวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอต

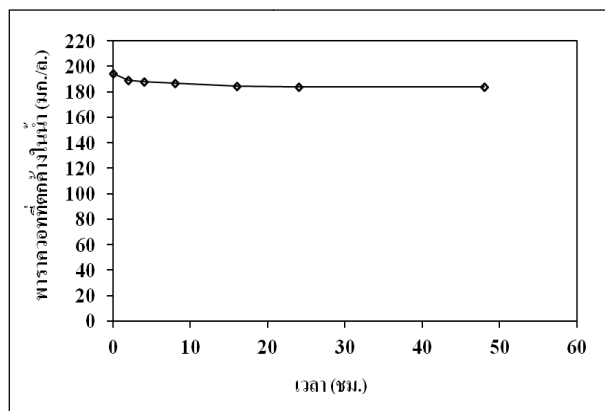
3.4 การย่อยสลายสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

จากผลการทดลองการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยฉายแสงด้วยหลอดไฟที่มีพลังงานใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากภาพ 7 พบว่าที่เวลา 48 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำมีค่าลดลงในช่วง 4 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มคงที่พอสมควร โดยคิดค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ลดลงเป็นร้อยละ 5.61 และเมื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสใน 4 ชั่วโมงแรก พบว่าอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในช่วงเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 1.6888 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.01 ต่อชั่วโมง ดังภาพ 8 และภาพ 9

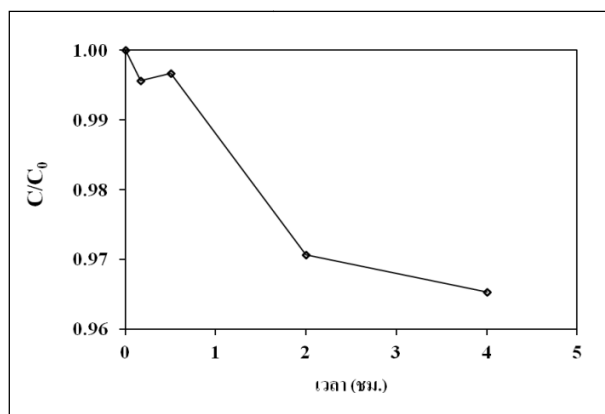
เมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่รัฐฟลอริดา (Florida) โดยการเตรียมสารพาราควอตที่ความเข้มข้น 28 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ฉายแสงด้วยหลอดไฟซีนอน (xenon lamp) ที่มีพลังงานแสงเทียบเท่ากับแสงแดดในฤดูร้อนของรัฐฟลอริดา ทำการทดลองระยะเวลา 36 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีพาราควอตคงค้างอยู่ในสารละลายคิดเป็นร้อยละ 94 - 95 เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสารพาราควอต [8] ซึ่งเห็นได้ว่า มีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลองในข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า สารพาราควอตเป็นสารที่มีความเสถียรภาพกับปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในสารละลายพีเอช 7

อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการย่อยสลายของสารพาราควอตโดยสัมผัสกับแสงยูวีจากหลอดไฟที่มีความดันปรอทปานกลางในระยะเวลา 3 วัน ซึ่งพบว่า การย่อยสลายสารพาราควอตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อมีการฉายแสงต่อ

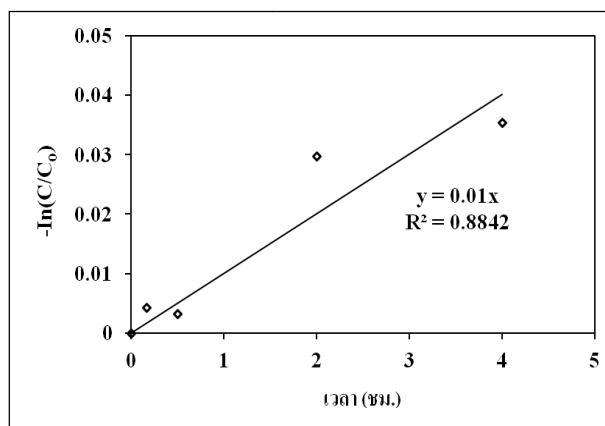
จะพบว่าสารพาราควอตย่อยสลายไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) และเมทิลามีน (methylamine) [8, 9] ดังภาพ 10



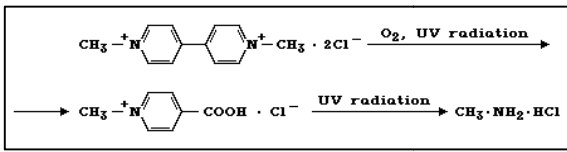
รูปที่ 7 ค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างในน้ำที่เวลาต่างๆ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส



รูปที่ 8 อัตราส่วนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอต ที่เวลา ชั่วโมง 4



รูปที่ 9 อัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอต ที่เวลา 4 ชั่วโมง

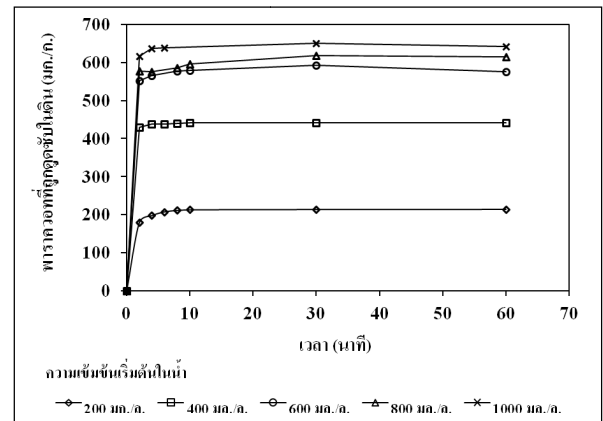


รูปที่ 10 ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยแสง [Slade,1965]

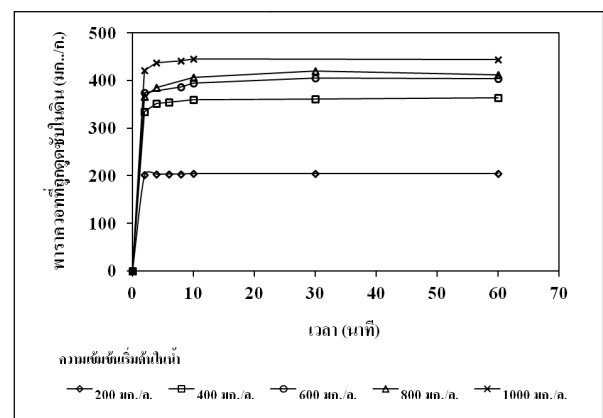
3.5 การดูดซับของสารพาราควอตในดิน

ลักษณะการดูดซับของสารพาราควอตในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายแสดงดังภาพ 8 และภาพ 9 ตามลำดับ โดยทำการทดลองการดูดซับที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารพาราควอตในน้ำ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากภาพ 8 ลักษณะการดูดซับสารพาราควอตในดินเหนียว ทั้ง 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำมีลักษณะการดูดซับอย่างรวดเร็วระหว่าง 8 ถึง 10 นาทีแรกที่มีการดูดซับ หลังจากนั้นลักษณะการดูดซับเริ่มช้าลงจนเป็นเส้นตรง โดยที่มีร้อยละการดูดซับ 98, 97, 90, 78.34 และ 62.69 ตามลำดับ เห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มต้นในน้ำต่ำจะมีร้อยละการดูดซับที่มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มต้นในน้ำสูง สำหรับลักษณะการดูดซับของสารพาราควอตในดินร่วนปนทรายในทั้ง 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำในภาพ 9 มีการดูดซับอย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรกที่มีการดูดซับ และหลังจากนั้นลักษณะการดูดซับเริ่มช้าลงจนเป็นเส้นตรง โดยที่มีร้อยละการดูดซับ 96.46, 84.24, 66.09, 52.29 และ 40.43 ตามลำดับ จากร้อยละการดูดซับพาราควอตในดินร่วนปนทรายพบว่า ความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มต้นในน้ำต่ำจะมีร้อยละการดูดซับที่มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารพาราควอตเริ่มต้นในน้ำสูงเช่นเดียวกันกับดินเหนียว

จากลักษณะการดูดซับสารพาราควอตในดิน เห็นได้ว่า สารพาราควอตสามารถดูดซับได้ดีในดินทั้งสองชนิด และดินเหนียวมีร้อยละการดูดซับสารพาราควอตมากกว่าดินร่วนปนทราย



รูปที่ 11 ลักษณะการดูดซับของสารพาราควอตในดินเหนียว



รูปที่ 12 ลักษณะการดูดซับของสารพาราควอตในดินร่วนปนทราย

เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยสมการการดูดซับของสารพาราควอตในดินทั้งสองชนิด โดยใช้สมการ 2 รูปแบบมาอธิบายได้แก่ สมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดลิช [31] ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{สมการแลงเมียร์} \quad \frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{K_1 b} + \frac{C_e}{b} \quad (1)$$

$$\text{สมการฟรุนดลิช} \quad C_s = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

โดย C_s เท่ากับมวลของสารพาราควอตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน (มิลลิกรัมต่อกรัม), C_e เท่ากับความเข้มข้นพาราควอตที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), K_1 เท่ากับค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ b เท่ากับความสามารถสูงสุดในการดูดซับ

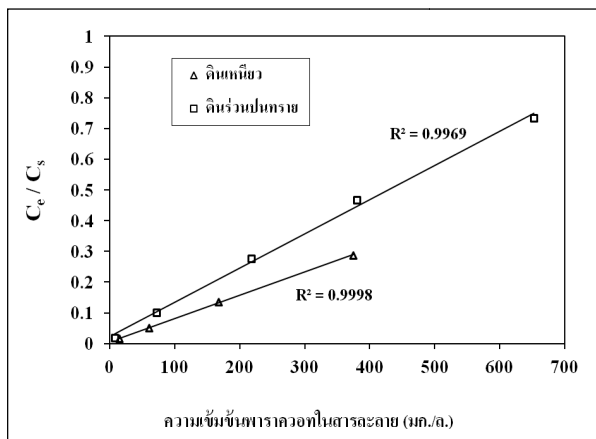
(มิลลิกรัมต่อกรัม), K_f เท่ากับค่าคงที่ของฟรุนดิช (ลิตรต่อกรัม) และ n เท่ากับค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (ไม่มีหน่วย)

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของดินทั้งสองชนิด โดยนำค่าความเข้มข้นพาราควอตที่สภาวะสมดุลต่อมวลของสารพาราควอตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักดิน (C_e/C_s) และค่าความเข้มข้นสารพาราควอตที่สภาวะสมดุล (C_e) มาเขียนกราฟดังภาพ 10 พบว่าลักษณะกราฟของดินทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9998 และดินร่วนปนทรายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9969 ซึ่งเข้าใกล้ 1 โดยสมการการดูดซับสารพาราควอตในดินทั้งสองชนิดตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เป็น

$$\text{ดินเหนียว; } \frac{1}{C_s} = \frac{0.0008}{0.1176C_e} + 0.0008 \quad (1.1)$$

$$\text{ดินร่วนปนทราย; } \frac{1}{C_s} = \frac{0.0011}{0.0464C_e} + 0.0011 \quad (1.2)$$

จากสมการการดูดซับสารพาราควอตของดินทั้งสองชนิดตามลักษณะไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ นำมาคำนวณค่าคงที่แลงเมียร์และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ แสดงดังตาราง 2



ภาพ 13 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอตในดินในรูปแบบแลงเมียร์

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่จากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของดินทั้งสองชนิด

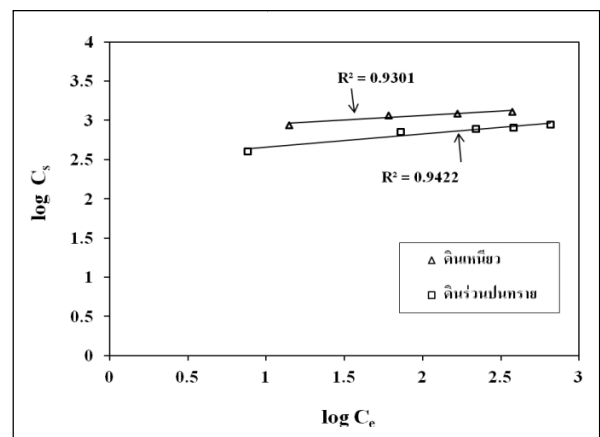
ชนิดดิน	ค่าคงที่ไอโซเทอมของแลงเมียร์		
	b (มิลลิกรัมต่อกรัม)	K_f (ลิตรต่อมิลลิกรัม)	R^2
ดินเหนียว	1,250.00	0.1176	0.9998
ดินร่วนปนทราย	909.09	0.0464	0.9969

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของดินทั้งสอง โดยนำค่า $\log C_s$ และ $\log C_e$ มาเขียนกราฟดังภาพ 11 พบว่าลักษณะกราฟของดินทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9301 ดินร่วนปนทรายมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9422 ซึ่งเข้าใกล้ 1 โดยมีสมการการดูดซับของสารพาราควอตของดินทั้งสองชนิดตามลักษณะไอโซเทอมแบบฟรุนดิชเป็น

$$\text{ดินเหนียว; } C_s = 669.2679C_e^{0.1175} \quad (2.1)$$

$$\text{ดินร่วนปนทราย; } C_s = 304.9299C_e^{0.1716} \quad (2.2)$$

จากสมการการดูดซับของสารพาราควอตของดินทั้งสองชนิดตามลักษณะไอโซเทอมแบบฟรุนดิช นำมาคำนวณค่าคงที่ฟรุนดิชและค่าคงที่ถดถอยซึ่งแสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (n) แสดงดังตาราง 3



รูปที่ 14 ไอโซเทอมการดูดซับของพาราควอตในดินในรูปแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่จากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของดินทั้งสองชนิด

ชนิดดิน	ค่าคงที่ไอโซเทอมของฟรุนดิช		
	n (ไม่มีหน่วย)	K_f (ลิตรต่อกรัม)	R^2
ดินเหนียว	8.5106	669.2679	0.9301
ดินร่วนปนทราย	5.8275	304.9299	0.9422

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จาก ไอโซเทอมของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟรุนดิช พบว่า ดินทั้งสองชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังนั้นการดูดซับของสารพาราควอตของดินทั้งสองชนิด มีลักษณะสอดคล้องกับการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีที่เกิดระหว่างอนุภาคดินและสารพาราควอต โดยอนุภาคดินและสารพาราควอตนั้นจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไอออนิก ซึ่งเป็นพันธะที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบ โดยประจุบวกในโมเลกุลของสารพาราควอตจะถูกดึงดูดด้วยแรงแร่ธาตุที่มีประจุลบในดินซึ่งจะเกิดการดึงดูดที่ผิวหน้าของดิน [10, 11] และมีการเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange) [12] โดยประจุบวกของสารพาราควอตจะเข้าไปแทนที่ประจุบวกในดิน (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) ทำให้ดินกับพาราควอตมีการดูดซับกันอย่างแข็งแรง

โดยดินเหนียวนั้นสามารถดูดซับสารพาราควอตได้ดีกว่าดินร่วนปนทราย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (b) และพบว่าดินเหนียวและดินร่วนปนทรายมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1,250.00 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 909.09 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ และค่าคงที่แลงเมียร์ของดินเหนียวและดินร่วนปนทรายมีค่าเท่ากับ 0.1176 ลิตรต่อมิลลิกรัมและ 0.0464 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ

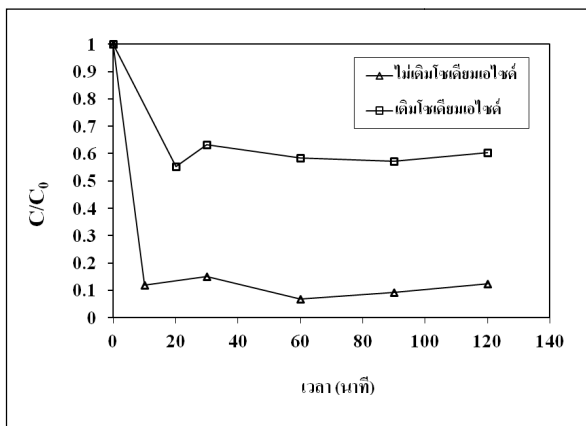
จากค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับและค่าคงที่การดูดซับดินเหนียว มีค่าที่ได้จากสมการแลงเมียร์มากกว่าดินร่วนปนทรายนั่นแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวสามารถดูดซับสารพาราควอตได้สูง

กว่าดินร่วนปนทราย โดยสอดคล้องกับผลของช่วงเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งพบว่าดินเหนียวเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าดินร่วนปนทราย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุในดิน และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน ซึ่งดินเหนียวมีค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 5.596 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าดินร่วนปนทรายที่มีร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 4.958 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่า

3.6 การย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดิน

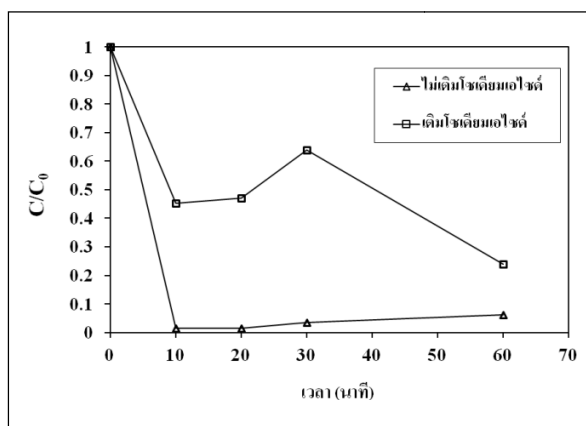
จากการทดลองการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินสองชนิด แสดงดังภาพ 12 และภาพ 13 โดยทำการทดลองออกเป็นสองชุด ชุดแรกไม่เติมโซเดียมเอไซด์ ($NaNO_3$) ลงในดิน ชุดที่สองเติมโซเดียมเอไซด์ลงในดิน และหาปริมาณจุลินทรีย์ในดิน การเติมโซเดียมเอไซด์ เป็นการยับยั้ง (inhibitor) การทำงานของจุลินทรีย์ โดยเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) ในแบคทีเรีย ซึ่งเป็นเอนไซม์ตัวสุดท้ายของระบบถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ทำหน้าที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนให้เป็นน้ำ [13] เมื่อโซเดียมเอไซด์เข้าไปยับยั้งการทำงานของไซโตโครมออกซิเดส ทำให้มีผลกระทบต่อกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์

จากภาพ 12 ลักษณะการทดลองการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียวพบว่า ที่เวลาเริ่มต้นดินเหนียวมีปริมาณจุลินทรีย์ 1.17×10^7 โคโลนี เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง การทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์มีปริมาณจุลินทรีย์ 9.5×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอตคิดเป็นร้อยละ 89 สำหรับในการทดลองที่มีการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์โดยการเติมสารโซเดียมเอไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 7.5×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของพาราควอตคิดเป็นร้อยละ 41 ซึ่งน้อยกว่าการทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมเอไซด์



รูปที่ 15 การย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินเหนียว

จากภาพ 13 ลักษณะการทดลองย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินร่วนปนทราย พบว่าที่เวลาเริ่มต้นดินร่วนปนทรายมีปริมาณจุลินทรีย์ 1.32×10^7 โคโลนี เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง การทดลองที่ไม่เติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 9.2×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายของสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอตคิดเป็นร้อยละ 97 สำหรับการทดลองที่มีการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ โดยการเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณจุลินทรีย์ 5.2×10^6 โคโลนี และมีการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ โดยการลดลงของสารพาราควอตคิดเป็นร้อยละ 54 ซึ่งน้อยกว่าการทดลองที่ไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 16 การย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินร่วนปนทราย

จากการย่อยสลายสารพาราควอตด้วยจุลินทรีย์ในดินทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของจุลินทรีย์มีผลต่อการย่อยสลายสารพาราควอต และภายใน 60 นาทีแรกจุลินทรีย์ภายในดินทั้งสองชนิด สามารถย่อยสลายสารพาราควอตได้อย่างรวดเร็ว โดยในดินร่วนปนทรายมีจุลินทรีย์ที่พร้อมย่อยสลายสารพาราควอตได้มากกว่าในดินเหนียว ซึ่งสังเกตจากร้อยละการลดลงของสารพาราควอตในดินทั้งสองชนิด โดยดินเหนียวมีการลดลงคิดเป็นร้อยละ 89 สำหรับดินร่วนปนทรายมีการลดลงคิดเป็นร้อยละ 97

เมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สายพันธุ์ที่มีชื่อว่า *Lipomyces starkeyi*. ในการย่อยสลายสารพาราควอตพบว่า จุลินทรีย์ชนิดนี้สามารถย่อยสลายสารพาราควอตได้อย่างรวดเร็วและสามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจุลินทรีย์ชนิดนี้ใช้ในโครเจนในสารพาราควอตเป็นแหล่งอาหาร [14, 15] นั้นแสดงให้เห็นว่าภายในดินมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารพาราควอตได้อย่างรวดเร็ว

4. สรุปผลการวิจัย

การทดลองเปลี่ยนรูปทางกายภาพและเคมีของสารพาราควอตที่เกิดขึ้นในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่เกษตรกรรม สามารถสรุปลักษณะการเปลี่ยนรูปของสารพาราควอตที่เกิดขึ้นในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่เกษตรกรรมได้ดังนี้

การระเหยกลายเป็นไอของสารพาราควอตที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตที่ตกค้างอยู่ในน้ำ ดังนั้น สารพาราควอตไม่ระเหยกลายเป็นไอ

การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารพาราควอตในน้ำน้อย โดยคิดเป็นร้อยละ 1.57 และมีอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารพาราควอตในช่วง 4 ชั่วโมงแรก เท่ากับ 1.7538 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และมีความถี่ในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0098 ต่อชั่วโมง แสดงให้เห็นได้ว่าสารพาราควอตมีความเสถียรภาพกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสารละลายพีเอช 7

การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอทที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้หลอดไฟที่มีพลังงานใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารพาราควอทในน้ำน้อย โดยคิดเป็นร้อยละ 5.61 และอัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของสารพาราควอทในช่วง 4 ชั่วโมงแรกมีค่าเท่ากับ 1.6888 มิลลิกรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.01 ต่อชั่วโมง ดังนั้นสารพาราควอทมีความเสถียรภาพกับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในสารละลายพีเอช 7

การดูดซับสารพาราควอทในดิน สารพาราควอทสามารถเข้าสู่สมดุลการดูดซับในดินภายในเวลา 8 ถึง 10 นาที โดยมีร้อยละการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวเท่ากับ 60–98 และร้อยละการดูดซับของสารพาราควอทในดินร่วนปนทรายเท่ากับ 40-95 และรูปแบบการดูดซับของสารพาราควอทในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีสมการการดูดซับเป็น

$$\begin{aligned} \text{ดินเหนียว;} \quad \frac{1}{C_s} &= \frac{0.0008}{0.1176C_e} + 0.0008 \\ \text{ดินร่วนปนทราย;} \quad \frac{1}{C_s} &= \frac{0.0011}{0.0464C_e} + 0.0011 \end{aligned}$$

ค่าคงที่ที่ได้จากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ในดินเหนียวมีค่าเท่ากับ 0.1176 ลิตรต่อมิลลิกรัม และค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1,250 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับดินร่วนปนทรายมีค่าคงที่แลงเมียร์เท่ากับ 0.0464 ลิตรต่อมิลลิกรัมและมีค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 909.091 มิลลิกรัมต่อกรัม

ดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับสารพาราควอทได้สูงและเข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็วกว่าดินร่วนปนทราย เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุในดินและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน ดินเหนียวมีค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 5.596 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 12.765 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าดินร่วนปนทรายที่มีค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 4.958 และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินเท่ากับ 10.524 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่า

การย่อยสลายของสารพาราควอทด้วยจุลินทรีย์ในดิน จุลินทรีย์มีผลต่อการย่อยสลายสารพาราควอทในระยะ 60 นาทีแรก จุลินทรีย์ในดินมีการย่อยสลายสารพาราควอทหลังจากนั้นเริ่มค่าคงที่ที่จะเห็นได้จากค่าสัดส่วนของสารพาราควอทไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเหลืออยู่ในสัดส่วนน้อยมาก ดังนั้นจุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายสารพาราควอทได้ดี

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของสารพาราควอทที่เกิดขึ้นในดินเพาะปลูก เห็นได้ว่า สารพาราควอทไม่เกิดการระเหย มีความเสถียรภาพกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาโฟโตไลซิส นั่นคือ เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาโฟโตไลซิสได้น้อย ในทางตรงกันข้าม สารพาราควอทเป็นสารที่สามารถดูดซับได้ดีในดินซึ่งการดูดซับเป็นการดูดซับที่แข็งแรง และสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดินได้ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สัญญาเลขที่ ภค./๒๕๕๕-๒๖ ภายใต้แผนงานวิจัยเรื่อง “การวิจัยเชิงบูรณาการเพื่อเสริมสร้างศักยภาพหน่วยงานท้องถิ่นในการจัดการและป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษบนพื้นที่ดินน่านาน”

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ทศพล พรพรม, สารป้องกันกำจัดวัชพืช: หลักการและกลไกการทำลายพืช, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [2] P. S. C. Rao, and J. M. Davidson, “Estimation of pesticide retention and transformation parameters required in nonpoint source pollution models,” in *Environmental Impact of Nonpoint Source Pollution*, M. R. Overcash and J. M. Davidson, Eds. Michigan, Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers, 1980, pp.10-114.
- [3] United States Environmental Protection Agency (EPA), “*Paraquat: Health advisory draft report*,” Washington, D.C.: Office of Drinking Water, 1987, pp. 10 – 112.

- [4] Y. Ouyang, R. S. Mansell, and P. Nkedi-Kizza, "Displacement of Paraquat Solution Through a Saturated Soil Column with Contrasting Organic Matter Content," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 73, pp. 725-731, 2004.
- [5] กรมพัฒนาที่ดิน. (กันยายน 2553). คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี, สืบค้นเมื่อ 2556 มกราคม 20, จาก <http://www.ddd.go.th/PMQA//2553Manual/OSD-.03pdf>
- [6] Lingyan Zhu, Baoling Ma, Lei Zhang, and Li Zhang, "The study of distribution and fate of nitrobenzene in a water/sediment microcosm," *Chemosphere*, vol. 69, pp. 579–1585, 2007.
- [7] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (January 21, 2000). *OECD Guideline for Testing of Chemicals, Adsorption – Desorption using a batch equilibrium method*, Retrieved August 24, 2012, from http://www.epa.gov/scipoly/sap/meetings/2008/october/106_adsorption_desorption_using.pdf.
- [8] Yamada, Dr. Y. (2002). *Paraquat (057)*, National Food Research Institute, Tsukuba, Japan, Retrieved May 21, 2013, from <http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests/Pesticides/JMPR/Evaluation09/Paraquat.pdf>.
- [9] P. Slade, "Photochemical degradation of paraquat," *Nature*, vol. 207, pp. 515-516, 1965.
- [10] R. Beckett, and N. P. Le, "The role of organic matter and ionic composition in determining the surface charge of suspended particles in natural waters," *Colloids and Surfaces*, vol. 44, pp. 35–49. 1989.
- [11] K. M. Spark, and R. S. Swift, "Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption," *The Science of the Total Environment*, vol. 298, pp.147-161, 2002.
- [12] Rhoda O. Mbuk, Rufus Sha Ato, and Nnadozie N. Nkpa, "The Role of Paraquat (1,1-dimethyl-4,4-bipyridinium dichloride) and Glyphosate (n-phosphonomethyl glycine) in Translocation of Metal Ions to Subsurface Soils," *Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry*, vol. 10, pp. 19-24, 2009.
- [13] B. Chance, and G. R. Williams, "Respiratory enzymes in oxidative phosphorylation: I. Kinetics of oxygen utilization," *Journal of Biological Chemistry*, vol. 217, pp. 383–393, 1955.
- [14] B. C. Baldwin, M. F. Bray, and M. J. Geoghegan, "The microbial decomposition of paraquat," *Biochemical Journal*, vol. 101, 15P, 1966.
- [15] J. R. Anderson, and E. Dew, "Growth characteristics of a species of *Lipomyces* and its degradation of paraquat," *Journal of General Microbiology*, 70, 43-58, 1972.